

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.874;621.396

УПРАВЛЕНИЕ ПОЛОСОЙ РАБОЧИХ ЧАСТОТ ИСКУССТВЕННОГО МАГНИТНОГО ПРОВОДНИКА

© 2019 г. Ю. Н. Казанцев¹, *, Г. А. Крафтмахер¹, В. П. Мальцев¹¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

*E-mail: yukazantsev@mail.ru

Поступила в редакцию 03.05.2018 г.

После доработки 03.05.2018 г.

Принята к публикации 21.06.2018 г.

Получены приближенные формулы для расчета коэффициента отражения от искусственного магнитного проводника (ИМП) на основе емкостной решетки, между элементами которой включены дополнительные емкости с целью управления полосой рабочих частот ИМП. Представлены результаты численных расчетов, подтверждающих корректность оценок по приближенным формулам. Теоретически показана и экспериментально подтверждена возможность реализации тонкого радиопоглотителя с управляемой рабочей полосой частот с помощью такого ИМП и резистивной пленки. Измерения, проведенные в волноводе сечением 72×34 мм², показали, что при изменении дополнительных емкостей в пределах 0...1.27 см средняя частота рабочей полосы радиопоглотителя изменялась в диапазоне 4.9...2.7 ГГц.

DOI: 10.1134/S0033849419050085

ВВЕДЕНИЕ

Искусственные магнитные проводники (ИМП), как правило, относят к классу метаматериалов, т.е. материалов с необычными электромагнитными свойствами. Так, при падении электромагнитной волны на ИМП на его поверхности формируется узел магнитного, а не электрического поля, т.е. коэффициент отражения равен +1, а не –1, как в случае отражения от электрического проводника.

Первой широко известной работой, посвященной созданию ИМП, была статья [1], в которой предложена структура в виде периодических решеток из грибообразных элементов на электропроводящей поверхности. В дальнейшем был опубликован ряд работ, в которых описаны ИМП на основе частотно-селективных поверхностей из элементов различной формы и решеток емкостного типа [2–4]. Применение ИМП открыло новые возможности при создании различных радиоэлектронных устройств: низкопрофильных антенн [5–7], миниэкранов электромагнитного излучения [8, 9] и радиопоглощающих структур [10, 11]. Определенным недостатком этих устройств являлось серьезное ограничение по ширине рабочей полосы частот, что было напрямую связано с относительной узкополосностью самих ИМП. Одним из путей компенсации этого недостатка является воз-

можность управления положением рабочей полосы ИМП на сетке частот.

В данной работе предлагается вариант такого управления с помощью переменных емкостей, включаемых между соседними элементами решетки емкостного типа, расположенной на слое диэлектрика, металлизированного с противоположной стороны.

1. ИМП НА ОСНОВЕ РЕШЕТКИ ЕМКОСТНОГО ТИПА

На рис. 1а изображен фрагмент ИМП на основе бипериодической решетки из тонких электропроводящих квадратов. Решетка расположена на диэлектрическом слое с диэлектрической проницаемостью ϵ и толщиной D , металлизированном с противоположной от решетки стороны. Поскольку расстояние δ между элементами собственно решетки из электропроводящих квадратов (рис. 1б) предполагается малым по сравнению с периодом P , коэффициент отражения от такой решетки практически не отличается от коэффициента отражения от решетки из электропроводящих полос (рис. 1в) для случая поляризации вектора электрического поля перпендикулярно полоскам. В работе [12] получены аналитические выражения для коэффициента отражения от решетки из тонких электропроводящих полос в свободном пространстве. Коэффициента отражения

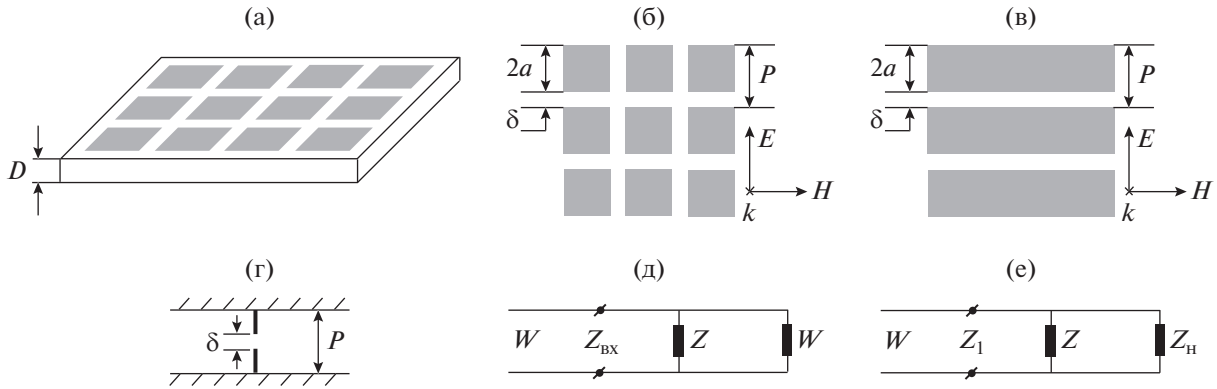


Рис. 1. ИМП на основе емкостной решетки: а – фрагмент ИМП, б – биериодическая решетка из тонких электропроводящих квадратов, в – решетка из тонких электропроводящих полос, г – один период решетки из электропроводящих полос, ограниченный проводящими плоскостями, д – его эквивалентная схема, е – эквивалентная схема ИМП.

R в случае $P \ll \lambda$ (λ – длина волны в свободном пространстве) выражается следующей формулой:

$$R = \frac{-1 - j[1/2P \ln(2P/\pi\delta)/\lambda]}{1 + 1/2P \ln(2P/\pi\delta)/\lambda}. \quad (1)$$

Зная коэффициент отражения R , достаточно просто рассчитать эффективную емкость между соседними полосками решетки. Для этого воспользуемся формальной процедурой путем замены решетки бесконечных размеров одним периодом решетки, ограничив его электропроводящими плоскостями, проходящими через середину соседних полосок параллельно их ребрам и перпендикулярно плоскости полосок, как показано на рис. 1г. Соответствующая эквивалентная схема представлена на рис. 1д, где обозначено: Z – импеданс электропроводящей перегородки со щелью шириной δ , а W – характеристическое сопротивление плоского волновода высотой P . Из эквивалентной схемы следует:

$$Z = \frac{WZ_{BX}}{W - Z_{BX}}, \quad (2)$$

где

$$Z_{BX} = W \frac{1 + R}{1 - R}. \quad (3)$$

Подставив в формулу (2) выражения (3) и (1), получим

$$Z = -j \frac{\pi W}{2kP \ln(2P/\pi\delta)}, \quad (4)$$

где $k = 2\pi/\lambda$. Аналогичная формула для адмиттанса была получена в работе [13].

Величину импеданса можно выразить также через погонную емкость C_0 (на единицу длины щели (м))

$$Z = -j \frac{\lambda}{2\pi c C_0} = -j \frac{1}{kc C_0}, \quad (5)$$

где $c = 3 \times 10^8$ м/с – скорость света.

Приравняв друг другу выражения для Z (4), (5) и подставив значение $W = 120\pi P$ Ом (P – в метрах), в результате получим выражение для емкости в системе единиц СИ –

$$C_0 = \frac{\ln(2P/\pi\delta)}{1.8\pi^2 \times 10^{10}} \text{ ф/м}, \quad (6)$$

или в системе единиц Гаусса –

$$C_0 = \frac{\ln(2P/\pi\delta)}{2\pi^2} \text{ см/см}. \quad (7)$$

На рис. 1е представлена эквивалентная схема ИМП на основе емкостной решетки с импедансом Z . Импеданс ИМП Z_1 легко определить из этой эквивалентной схемы

$$Z_1 = \frac{ZZ_H}{Z + Z_H}, \quad (8)$$

где

$$Z_H = jW \operatorname{tg} kD \quad (9)$$

– импеданс нагрузки согласно эквивалентной схеме рис. 1е, а импеданс решетки Z определяется формулой (4). Относительная проницаемость диэлектрического слоя ИМП ϵ здесь принята равной единице.

Подставив в выражение (8) формулы (4) и (9), а также учитывая соотношение (7), получим

$$Z_1 = j \frac{W \operatorname{tg} kD}{1 - 4\pi k P C_0 \operatorname{tg} kD}. \quad (10)$$

Коэффициент отражения R_1 от ИМП можно определить по известной формуле

$$R_1 = \frac{Z_1 - W}{Z_1 + W}, \quad (11)$$

или, с учетом (10), по формуле –

$$R_1 = \frac{j \operatorname{tg} kD + 4\pi k P C_0 \operatorname{tg} kD - 1}{j \operatorname{tg} kD - 4\pi k P C_0 \operatorname{tg} kD + 1}. \quad (12)$$

Из формулы (12) следует: во-первых, $|R_1| = 1$ и, во-вторых, $R_1(k_p) = +1$, где k_p – волновое число на резонансной частоте удовлетворяет уравнению

$$4\pi k_p P C_0 \operatorname{tg} k_p D - 1 = 0. \quad (13)$$

Уравнение (13) определяет резонансную частоту $f_p = ck_p/2\pi$, на которой рассматриваемая структура является идеальным магнитным проводником. При выполнении неравенства $kD \ll 1$ резонансная частота оценивается по следующей приближенной формуле:

$$f_p = \frac{c}{4\sqrt{\pi^3 C_0 D P}}. \quad (14)$$

В частотном диапазоне F

$$\frac{F}{f_p} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_p} = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_p},$$

фаза коэффициента отражения R_1 изменяется в интервале $\pm\pi/2$, где крайние частоты диапазона $f_{\max} = ck_{\max}/2\pi$ и $f_{\min} = ck_{\min}/2\pi$ определяются из уравнения

$$\operatorname{tg} kD \pm (4\pi k P C_0 \operatorname{tg} kD - 1) = 0. \quad (15)$$

Знак $\pm$ соответствует минимальной и максимальной частотам, соответственно. При $kD \ll 1$ относительная ширина полосы частот F/f_p оценивается по простой формуле

$$F/f_p = k_p D. \quad (16)$$

Как было указано ранее, формулы для коэффициента отражения, резонансной частоты и относительной полосы частот были получены для ИМП на основе решетки из электропроводящих полос. Однако с некоторой поправкой они остаются справедливыми и для случая решетки из электропроводящих квадратов при выполнении условия $\delta \ll P$. В последнем случае емкость между соседними квадратами составит $C_0(P - \delta)$, а средняя эффективная погонная емкость на единицу длины равна $C_0(P - \delta)/P$. Включение между квадратами дополнительной емкости C_d увеличит эффективную емкость на единицу длины до величины

$$C_{\text{эф}} = \frac{C_0(P - \delta) + C_d}{P}. \quad (17)$$

Поэтому при расчете коэффициента отражения, резонансной частоты и относительной полосы частот ИМП на основе решетки из квадратов в формулах (12)–(15) емкость C_0 следует заменить на $C_{\text{эф}}$.

В качестве расчетной модели примем ИМП со следующими характеристиками: $P = 8.5$ мм, $2a = 8.2$ мм ($\delta = 0.03$ мм), $D = 4$ мм, $\epsilon = 1$. Для

Таблица 1. Расчетные значения параметров исследуемого ИМП (эффективной емкости $C_{\text{эф}}$, резонансной частоты f_p , частотного диапазона F/f_p) для различных дополнительных емкостей C_d

C_d , см	$C_{\text{эф}}$, см	f_p , ГГц	F/f_p
0	0.141	5.90	0.47
0.1	0.259	4.43	0.36
0.2	0.376	3.71	0.30
0.3	0.494	3.24	0.27
0.4	0.612	2.92	0.24
0.5	0.729	2.68	0.22
0.7	0.965	2.33	0.19
1	1.318	2.05	0.16
1.5	1.906	1.67	0.14
2	2.494	1.46	0.12
3	3.671	1.21	0.10

этой модели $C_0 = 0.146$ см и $C_{\text{эф}} = 0.141$ см. В таблице 1 приведены значения $C_{\text{эф}}$, f_p и F/f_p , рассчитанные с помощью уравнений (13), (15) и (17) соответственно, для различных емкостей C_d .

На рис. 2 представлены зависимости фазы коэффициента отражения R_1 от частоты для трех значений C_d : 0, 0.5 и 1 см. Данные таблицы и рис. 2 демонстрируют возможность управления рабочей полосой ИМП в достаточно широких пределах, хотя с увеличением емкости C_d и уменьшением резонансной частоты f_p относительная ширина полосы F/f_p заметно уменьшается.

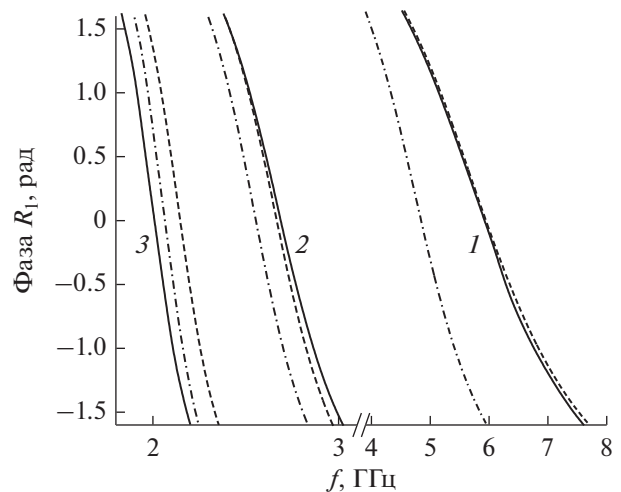


Рис. 2. Частотные зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП для $C_d = 0$ (1), 0.5 (2) и 1 см (3); сплошные кривые – приближенный расчет, штриховые – численный расчет при $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$, штрихпунктирные – численный расчет при $\epsilon_1 = 3$, $\epsilon_2 = 1.1$.

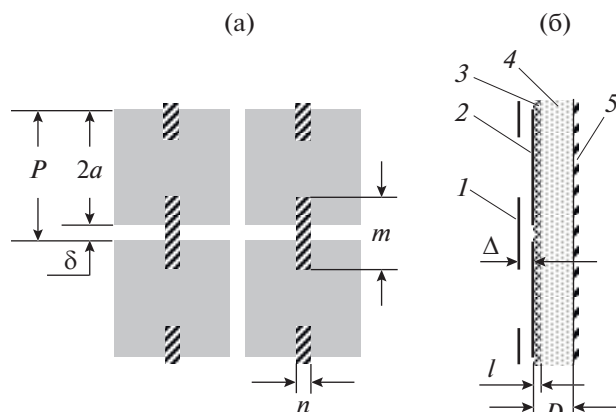


Рис. 3. Расчетная модель емкостной решетки с дополнительными емкостями в виде металлических накладок, а – вид сверху, б – вид сбоку.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ ИМП

На рис. 3 показана расчетная модель емкостной решетки с дополнительными емкостями C_d в виде металлических накладок l размером $m \times n$ с воздушным зазором Δ между накладкой и элементом 2. Емкостная решетка расположена на диэлектрической пленке 3 толщиной l с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 и на диэлектрическом слое 4 толщиной $D - l$ с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 , который металлизирован с противоположной от пленки стороны 5.

Были рассчитаны частотные зависимости коэффициента отражения от бесконечной решетки с теми же размерами $2a$, P , D , что и в разделе 1 и размерами $m = 6$, $n = 1$ и $l = 0.15$ мм (см. рис. 3) для двух случаев: 1) $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$; 2) $\epsilon_1 = 3$, $\epsilon_2 = 1.1$.

Рассмотрим *первый случай* $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$. Частотные зависимости фазы коэффициента отражения, рассчитанные численно, приведены на рис. 2 (штриховые кривые) для тех же значений дополнительной емкости C_d , что и в разделе 1. Эти значения определялись неизменными значениями n , m , δ и переменным размером Δ согласно известной формуле для емкости двух последовательно соединенных плоских конденсаторов:

$$C_d = \frac{n(m - \delta)}{16\pi\Delta}. \quad (18)$$

Второй случай, $\epsilon_1 = 3$, $\epsilon_2 = 1.1$, соответствует случаю, когда емкостная решетка расположена на пленке из лавсана и слое диэлектрика из пенопласта. Для этого случая частотные зависимости фазы коэффициента отражения приведены на рис. 2 (штрихпунктирные кривые) для тех же размеров и тех же значений C_d , что и в первом случае.

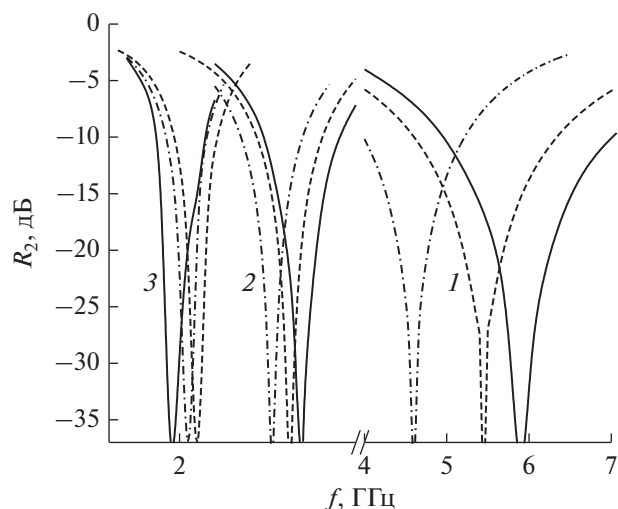


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения от ИМП с резистивной пленкой для $C_d = 0$ (1), 0.5 (2) и 1 см (3); сплошные кривые – приближенный расчет, штриховые – численный расчет при $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$, штрихпунктирные – численный расчет при $\epsilon_1 = 3$, $\epsilon_2 = 1.1$.

Как и следовало ожидать, увеличение ϵ_1 и ϵ_2 привело к снижению резонансных частот и уменьшению относительной величины перестройки рабочей полосы ИМП из-за увеличения собственной емкости решетки.

Приближенные и численные результаты для случая $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$, приведенные на рис. 2, хорошо согласуются.

3. УПРАВЛЯЕМЫЕ РАДИОПОГЛОТИТЕЛИ

Возможность перестройки рабочей полосы частот ИМП может быть использована при создании управляемых радиопоглочителей (РП). Так, в работах [10, 11] описаны неуправляемые РП на основе ИМП, на поверхность которого нанесена резистивная пленка с сопротивлением, равным волновому сопротивлению свободного пространства 120π Ом. Применение в этой схеме рассматриваемого здесь ИМП дает возможность управлять рабочей полосой РП. Коэффициент отражения R_2 от ИМП с резистивной пленкой на его поверхности несложно определить, используя процедуру, аналогичную той же, что применялась при получении выражения для R_1 :

$$R_2 = \frac{1 - 4\pi k P C_{\text{эф}} \operatorname{tg} k D}{2j \operatorname{tg} k D - 4\pi k P C_{\text{эф}} \operatorname{tg} k D + 1}. \quad (19)$$

На рис. 4 представлены частотные зависимости модуля коэффициента отражения, рассчитанные по формуле (19), для тех же значений C_d ,



Рис. 5. Внешний вид образца ИМП без дополнительных емкостей и резистивной пленки.

что на рис. 2. На рис. 4 также приведены результаты численного расчета модуля коэффициентов отражения от РП с резистивной пленкой с сопротивлением 120π Ом на квадрат, расположенной на расстоянии 1 мм от поверхности ИМП для тех же двух случаев, что и в разделе 2: $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$ и $\epsilon_1 = 3, \epsilon_2 = 1.1$.

Отметим, что резонансные частоты РП с резистивной пленкой ниже резонансных частот ИМП без резистивной пленки, что более заметно для случая $C_d = 0$. Это можно объяснить тем, что наличие резистивной пленки увеличивает эффективную емкость структуры.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Были измерены резонансные частоты образца ИМП с такими же размерами структуры и теми же значениями ϵ_1 и ϵ_2 , что и во второй расчетной модели ($\epsilon_1 = 3, \epsilon_2 = 1.1$) в условиях волноводного распространения волн. Резонансные частоты определяли по частотным зависимостям коэффициента отражения от образца ИМП, перед которым на расстоянии 1 или 2 мм помещали резистивную пленку с сопротивлением, близким к волновому сопротивлению свободного пространства. Внешний вид образца с поперечными размерами 34×72 мм² без дополнительных емкостей C_d и резистивной пленки приведен на рис. 5. Дополнительные емкости в образце были реализованы тем же методом, что и у расчетных моделей. Однако в отличие от них диэлектрическая проницаемость материала в зазоре между накладкой и элементом равнялась 3, размеры $\Delta = 0.1$ мм, $m = 3$ мм сохранялись неизменными, а размер n принимал значения 0, 1.5, 4.5 и 8 мм, которым со-

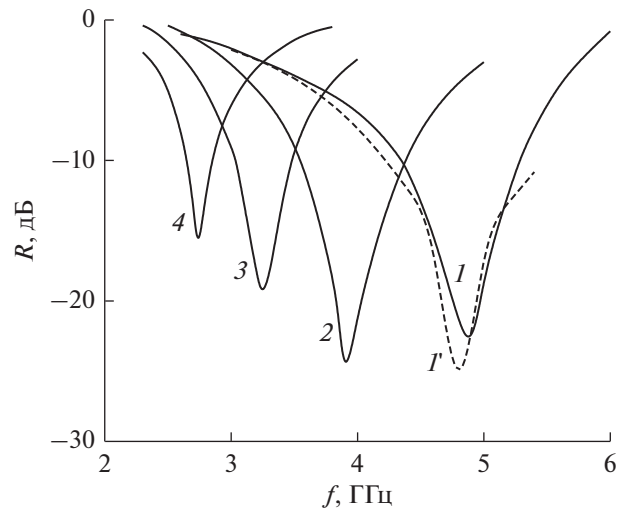


Рис. 6. Измеренные (1–4) и рассчитанная (1') частотные зависимости модуля коэффициента отражения от образца ИМП с резистивной пленкой при $C_d = 0$ (1, 1'), 0.24 (2), 0.72 (3) и 1.27 см (4).

ответствовали дополнительные емкости $C_d = 0, 0.24, 0.72$ и 1.27 см.

На рис. 6 представлены измеренные частотные зависимости модуля коэффициента отражения R от образца ИМП с резистивной пленкой, расположенной на расстоянии 1 мм от поверхности ИМП. Аналогичные измерения при расстоянии 2 мм между резистивной пленкой и поверхностью образца дали близкие результаты. На рис. 6 также приведен результат численного расчета для случая $C_d = 0$. Отметим, что в волноводе шириной A уравнение, связывающее резонансную частоту с эффективной емкостью $C_{эф}$,

$$4\pi k_p P C_{эф} \operatorname{tg}(D\sqrt{k_p^2 - (\pi/A)^2}) - 1 = 0 \quad (20)$$

несколько отличается от уравнения (13) для свободного пространства.

В отсутствие дополнительной емкости эффективная емкость для образца ИМП, вычисленная с помощью уравнения (20) по результатам измерения f_p , составляет $C_{эф} = 0.235$ см, что близко к расчетному значению для ИМП бесконечной площади. Поскольку в данном эксперименте ширина n емкостной накладки составила значительную часть от размера $2a = P - \delta$ элемента решетки, вычисление резонансных частот при различных дополнительных емкостях с помощью выражений (20) и (17) может носить лишь оценочный характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На типовом варианте ИМП на основе емкостной решетки показана возможность управления

рабочей полосой частот с помощью дополнительных переменных емкостей, изменяющих эффективную емкость решетки. С помощью теории длинных линий получены приближенные аналитические выражения для расчета резонансных частот и коэффициента отражения от ИМП с дополнительными емкостями. Корректность приближенных формул подтверждена численными расчетами при различных значениях дополнительной емкости. Теоретически показана и экспериментально подтверждена возможность применения ИМП на основе емкостной решетки для реализации управляемого радиопоглотителя. Так, волноводные измерения образца такого радиопоглотителя показали, что при изменении дополнительных емкостей в интервале 0...1.27 см средняя частота рабочей полосы радиопоглотителя изменялась в диапазоне 4.9...2.7 ГГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sievenpiper D., Zhang L., Broas R.F.J. et al.* // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 11. P. 2059.
2. *Hiranandani M.A., Yakovlev A.B., Kishk A.A.* // IEEE Proc.-Microw. Antennas Propag. 2006. V. 153. № 5. P. 487.
3. *Zhang Y., von Hagen J., Younis M. et al.* // IEEE Trans. 2003. V. MTT-51. № 10. P. 2704.
4. *Казанцев Ю.Н., Анлеталин В.Н.* // РЭ. 2007. Т. 52. № 4. С. 415.
5. *Broas R.F.J., Sievenpiper D.F., Yablonovitch E.* // IEEE Trans. 2001. V. MTT-49. № 7. P. 1262.
6. *Yang F., Rahmat-Samii Y.* // IEEE Trans. 2003. V. MTT-51. № 10. P. 2691.
7. *Feresidis A.P., Goussetis G., Wang Sh., Vardaxoglou J.C.* // IEEE Trans. 2005. V. MTT-53. № 1. P. 209.
8. *Казанцев Ю.Н., Анлеталин В.Н., Солосин В.С.* // РЭ. 2008. Т. 53. № 3. С. 316.
9. *Казанцев Ю.Н., Солосин В.С.* // РЭ. 2014. Т. 59. № 12. С. 1188.
10. *Engheta N.* // Antennas and Propagation Society International Symp., 2002. IEEE. V. 2. P. 392.
11. *Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П., Солосин В.С.* // РЭ. 2018. Т. 62. № 8. С. 765.
12. *Айзенберг Г.З., Янпольский В.Г., Терешин О.Н.* Антенны УКВ. М.: Связь, 1977. Ч. 2.
13. *Arnaud J.A., Pelow F.A.* // The Bell System Technical J. 1975. V. 54. № 2. P. 263.